



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
AGUACARRERA DE GEOCIENCIAS

**CARACTERIZACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA DEL
PIEDEMONTES AMAZÓNICO, SECTOR ALTO TENA MEDIANTE
TOMOGRÁFIA SÍSMICA**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR

WALTER ISAC MOPOSITA MOPOSITA

Napo - Ecuador
2023



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
AGUACARRERA DE GEOCIENCIAS**

**CARACTERIZACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA DEL
PIEDEMONTES AMAZÓNICO, SECTOR ALTO TENA MEDIANTE
TOMOGRÁFIA SÍSMICA**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: WALTER ISAC MOPOSITA MOPOSITA

TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO SORIA

Napo - Ecuador
2023

**DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y
RESPONSABILIDAD**

Yo, WALTER ISAC MOPOSITA MOPOSITA con documento de identidad N°1804651105, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 20 de enero de 2023

Walter Isac Moposita Moposita

C.I. 1804651105

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, WALTER ISAC MOPOSITA MOPOSITA, con documento de identidad N°1804651105, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: CARACTERIZACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA DEL PIEDEMONTES AMAZÓNICO, SECTOR ALTO TENA MEDIANTE TOMOGRAFÍA SÍSMICA, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Tena, 20 de enero de 2023



Walter Isac Moposita Moposita
C.I. 1804651105

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el Trabajo de Integración Curricular Titulado: **CARACTERIZACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA DEL PIEDEMONTES AMAZÓNICO, SECTOR ALTO TENA MEDIANTE TOMOGRAFÍA SÍSMICA**, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: **Walter Isac Moposita Moposita**, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 20 de enero de 2023

José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

AGRADECIMIENTO

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

Agradezco a mi tutor al Ph.D. José Sebastián Araujo quien con su profesionalidad, consejos y apoyo hizo posible que esta investigación sea posible. Además, a todos los profesores que me dedicaron tiempo y espacio para compartir sus conocimientos y experiencias.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD..... iii

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL iv

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR...v

AGRADECIMIENTO vi

TABLA DE CONTENIDO vii

ÍNDICE DE TABLAS..... viii

ÍNDICE DE FIGURAS ix

RESUMEN 1

ABSTRACT 2

INTRODUCCIÓN 3

Área De Estudio 5

Marco Geológico 6

METODOLOGÍA 9

Levantamiento Sísmico 9

Procesamiento De Datos 9

Picado De Primeras Llegadas 10

Generación De Dromocronas 10

Generación Del Modelo Inicial..... 11

Generación De Tomografía Sísmica 11

RESULTADOS 14

DISCUSIÓN 17

CONCLUSIONES 19

REFERENCIAS 1

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1: Parámetros empleados para el desarrollo del modelo de refracción sísmica inicial. 11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de ubicación de las líneas de tomografía sísmica.....	6
Figura 2:	Mapa geológico de la zona de estudio.	8
Figura 3:	Esquema de la configuración de geófonos empleada para el levantamiento sísmico.....	9
Figura 4:	A la izquierda se muestran las dromocronas de la línea sísmica Principal (a) y a la derecha las dromocronas de la línea transversal (b).	10
Figura 5:	Modelo inicial generado para la línea sísmica Principal (a) y Transversal (b).	11
Figura 6:	Gráfico de convergencia para el RMS a lo largo de las iteraciones con suavizado horizontal 1, y suavizado vertical de 0.3 a 1.0.....	14
Figura 7:	Gráfico de las curvas L para la Línea Principal (a) y Transversal (b).....	15
Figura 8:	Resultado de la tomografía de refracción sísmica para la Línea Principal (a) y Transversal (b).....	16
Figura 9:	Interpretación de las unidades sismoestratigráficas identificadas en los resultados de tomografía sísmica.	17

RESUMEN

La tomografía sísmica es una técnica de geofísica no invasiva que permite obtener información geológica-estructural y parámetros geotécnicos del subsuelo, tales como: lineamientos, fallas geológicas o velocidad de onda P. Esta información es clave para la planificación y ordenamiento territorial de los asentamientos humanos. Se establecieron dos líneas sísmicas de 55 metros de longitud con 12 geófonos separados cada 5 metros. La metodología consistió en discriminar entre las primeras señales sísmicas y el ruido ambiental empleando sismogramas. Posteriormente, se generaron dromocronas para establecer un modelo primario de tomografía de 15 metros de profundidad, para cada línea sísmica. Para generar el modelo de tomografía sísmica final se resolvió un problema inverso a partir del método de mínimos cuadrados. En función de la variación de ondas P se interpretó 3 unidades sismo-estratigráficas para ambas líneas sísmicas. En la línea principal, la unidad 1 es sub-horizontal y presenta un adelgazamiento en la parte central, las velocidades de onda oscilan entre 0.30 km/s a 0.45 km/s, corresponden a material superficial altamente meteorizado. La unidad 2, presenta un espesor constante de 6 metros, las velocidades de onda están entre 0.50 km/s a 0.70 km/s que indican materiales de tamaño arena. La unidad 3, se define por velocidades de onda entre 0.70 km/s a 0.97 km/s que corresponden a gravas y arenas de regolito provenientes del granito de Abitagua. La unidad 1 de la línea transversal, disminuye su espesor hasta los 35 metros, se define por velocidades de 0.11 km/s a 0.25 km/s que corresponden a materiales altamente meteorizados. La unidad 2 tiene una geometría irregular desde los 38 a 55 metros donde aflora en superficie, se define por velocidades de 0.25 a 0.40 km/s que corresponde a materiales superficiales meteorizados. La unidad 3 se define por velocidades de onda entre 0.40 km/ a 0.73 km/s y corresponden a materiales de tamaño arena.

Palabras clave: tomografía sísmica, Reserva Colonso-Chalupas, granito de Abitagua, erosión, piedemonte amazónico.

ABSTRACT

Seismic tomography is a non-invasive geophysical technique that allows obtaining geological-structural information and geotechnical parameters of the subsoil, such as: lineaments, geological faults or P-wave velocity. This information is key for planning and land use planning of human settlements. Two seismic lines of 55 meters in length were established with 12 geophones separated every 5 meters. The methodology consisted of discriminating between the first seismic signals and the environmental noise using seismograms. Subsequently, dromochrons were generated to establish a 15-meter depth primary tomography model for each seismic line. To generate the final seismic tomography model, an inverse problem was solved using the least squares method. Based on the P-wave variation, 3 seismic-stratigraphic units were interpreted for both seismic lines. In the main line, unit 1 is sub-horizontal and presents a thinning in the central part, the wave velocities oscillate between 0.30 km/s to 0.45 km/s, corresponding to highly weathered surface material. Unit 2 has a constant thickness of 6 meters, wave velocities are between 0.50 km/s to 0.70 km/s indicating sand-sized materials. Unit 3 is defined by wave velocities between 0.70 km/s to 0.97 km/s corresponding to regolith gravels and sands from the Abitagua granite. Unit 1 of the transverse line, decreasing in thickness to 35 meters, is defined by velocities of 0.11 km/s to 0.25 km/s corresponding to highly weathered materials. Unit 2 has an irregular geometry from 38 to 55 meters where it outcrops at the surface, it is defined by velocities of 0.25 to 0.40 km/s corresponding to superficial weathered materials. Unit 3 is defined by wave velocities between 0.40 km/ to 0.73 km/s and corresponds to sand-sized materials.

Keywords: seismic tomography, Colonso-Chalupas Reserve, Abitagua granite, weathering, Amazonian foothills.

INTRODUCCIÓN

La tomografía sísmica es una técnica de geofísica que permite reconstruir una imagen de la estructura interna de la Tierra mediante la medición del tiempo en el que los rayos sísmicos se propagan a través del subsuelo y son detectados por sensores. Los sensores son denominados geófonos y son dispuestos a lo largo de una línea sísmica o de prospección (Kearey et al. 2002). Esta técnica permite determinar la estructura del subsuelo y sus propiedades físicas a partir de datos obtenidos desde la superficie, mediante la interpretación de los tiempos de recorrido de las ondas longitudinales o también llamadas ondas P (Gómez et al. 2019).

Además, esta técnica puede ser aplicada para evaluar la variación estratigráfica de un sitio, determinación del nivel freático y techo del macizo rocoso; determinar el grado de fracturación y alteración de las rocas, detección de fallas geológicas y determinación de parámetros geotécnicos dinámicos para el diseño de fundiciones. Como se observa, todas estas aplicaciones recaen en el campo de la ingeniería geológica-geotécnica (Grelle y Guadagno 2009; Mojica Ábrego et al. 2012; Rinaldi et al. 2016), proporcionando parámetros geotécnicos del suelo, los cuales suelen ser claves principalmente para la ingeniería civil. Por lo tanto, la tomografía sísmica toma un papel fundamental, al ser efectiva, poco costosa y no invasiva a la hora de realizar una caracterización del subsuelo (Parada 2018).

Así mismo, Pedraza (2005) realizó la interpretación litológica del subsuelo del distrito Skellefte al norte de Suecia, a partir de la técnica de tomografía sísmica de refracción, donde se observaron varios estratos, entre ellos una capa de baja velocidad correspondiente a sedimentos glaciares, la cual se dispone sobre una capa de alta velocidad que corresponde a la litología de un granito, además de lograr identificar una estructura de sinclinal. Por otro lado, Imani et al. (2021) en su estudio llevado a cabo en la provincia de Zhejiang (China), afirma que la tomografía sísmica de refracción permite caracterizar zonas de deslizamientos.

El resultado de aplicar tomografía sísmica para el estudio del subsuelo es obtener velocidades de ondas sísmicas, como la onda P, denominadas primarias o de compresión (González de Vallejo et al. 2002). Mediante los valores de velocidad de

las está onda, es posible definir el tipo de material y las propiedades geológicas y geotécnicas de suelos y rocas (González de Vallejo et al. 2002). En literatura, abundan las referencias a tablas de velocidades para los materiales geológicos. Una de las más conocidas es la Guía Estándar para el uso del método de Refracción Sísmica (ASTM 2000), donde se menciona que las velocidades de onda P para materiales meteorizados superficialmente oscilan en un rango de 240 – 610 m/s, o para la grava y arena seca, entre 460 – 915 m/s (ASTM 2000). De igual manera, existen estudios que relacionan los valores de velocidad de onda P con parámetros geotécnicos como: calidad de la roca, ángulo de fricción, densidad relativa, entre otros (Bery y Saad 2012). Es importante mencionar que el grado de alteración de las rocas disminuye definitivamente las velocidades de onda, por ejemplo, las rocas graníticas sin meteorización suelen presentar velocidades de onda P de 5000 m/s, mientras que un granito altamente meteorizado, presenta velocidades de hasta 1000 m/s (González de Vallejo et al. 2002).

El piedemonte amazónico en el Ecuador se desarrolla a lo largo del borde este de la Cordillera Oriental, donde afloran un grupo de batolitos calco-alcalinos cuya edad se data desde el Jurásico (Ruiz 2002). En la parte central de la Cordillera Oriental, se encuentra el piedemonte de la provincia Napo, donde se pueden observar rocas del batolito de Abitagua, cuya composición es monzogranítica biotítica (Reyes 2009).

La geomorfología del piedemonte amazónico se caracteriza por los relieves colinados con pendientes moderadamente fuertes y conos de deyección de depósitos coluvio-aluviales que, en conjunto forman el paisaje en esta zona (GAD Tena 2020).

La descripción del piedemonte amazónico tanto en el contexto geológico y geomorfológico se ha realizado en una escala regional (Ruiz 2002; Pratt et al. 2005). Sin embargo, una descripción a una escala local del piedemonte es necesario para fines más específicos como la evaluación de amenazas por deslizamientos o para la toma de decisiones pertinentes al ordenamiento territorial. En este sentido, el presente estudio plantea realizar la caracterización sismoestratigráfica en un sector ubicado 1 Km al suroeste de la comunidad Alto Tena basado en un modelo de velocidad de ondas P mediante la técnica de tomografía sísmica, con la finalidad de conocer la estructura del suelo y del subsuelo. Con base en el contexto geológico local del área de estudio, descrito en el siguiente apartado, se esperaría determinar conglomerados, areniscas

y restos de granito altamente meteorizado (Baby et al. 2004). Una de las ventajas que proporciona la tomografía sísmica es el alto grado de detalle en el que se generan los modelos ya que las capas de baja velocidad, así como las fuertes gradientes y buzamientos no son una limitante para esta técnica (Zafra 2018).

Área De Estudio

El área de estudio se encuentra al sur de la provincia de Napo, dentro del cantón Tena y parroquia Muyuna (Fig. 1). Una región caracterizada por altas precipitaciones y humedad, variable temperatura y relieve. La precipitación anual dentro del cantón Tena es superior a 3800 mm; mayo, junio y julio son los meses con mayor precipitación (> 450 mm). La humedad promedio mensual es del 89%, en los meses de marzo a junio se presentan valores superiores al 90% y en los meses de septiembre y octubre, humedades de hasta el 88%, lo cual evidencia una alta humedad para el área de estudio. Las temperaturas establecidas con base en las estaciones meteorológicas más cercanas muestran un promedio mensual de 24 ° centígrados, siendo los meses de junio y julio que presentan temperaturas menores al promedio. Además, el relieve de la zona varía entre los 740 a 800 m.s.n.m. (GAD Tena 2020).

Las líneas sísmicas se han establecido en el piedemonte amazónico, una región ubicada en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental que se caracteriza por presentar relieves montañosos, colinas irregulares con pendientes moderadas a fuertes, valles y llanuras fluviales (MAAE 2013, GAD Tena 2020). En la Figura 1 se muestra un mapa de ubicación donde se presenta las fronteras y características físicas como relieve, red hidrográfica, red vial y comunidades cercanas.

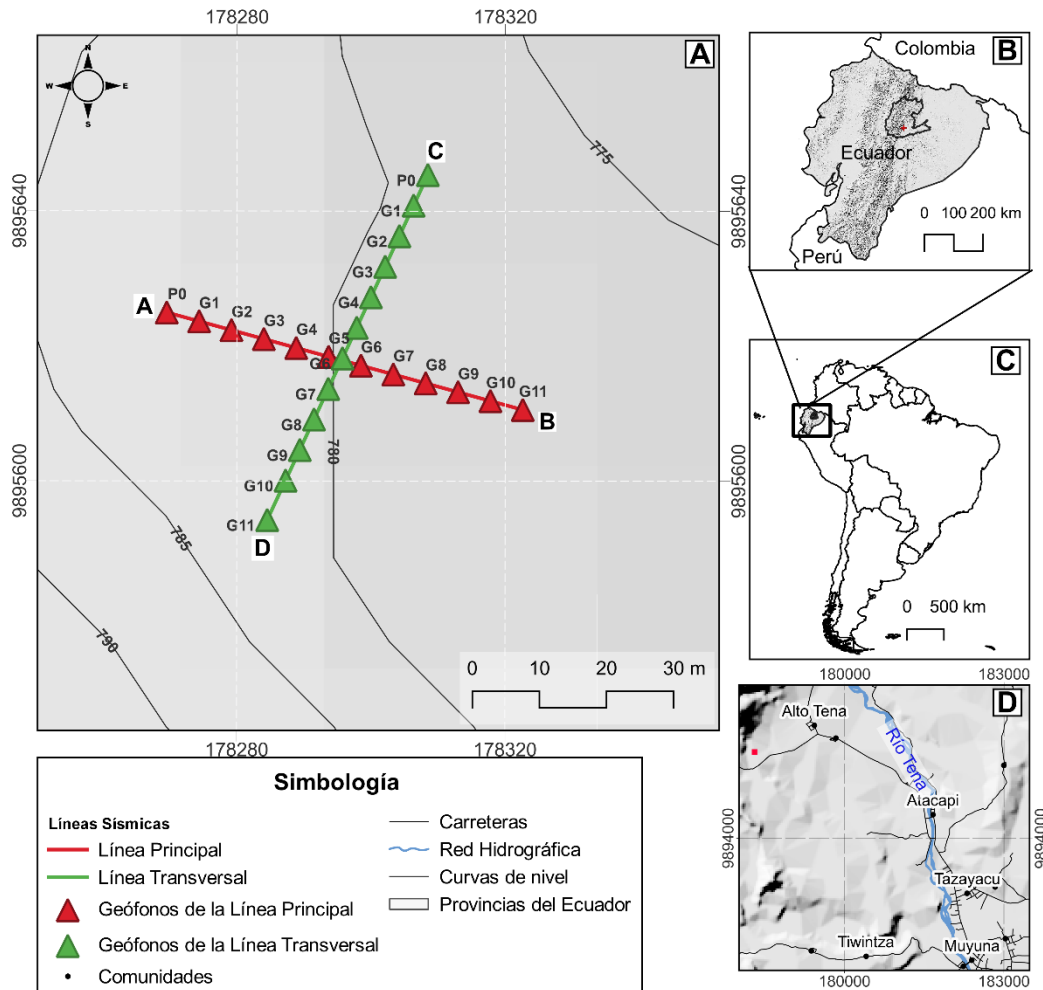


Figura 1: Mapa de ubicación de las líneas de tomografía sísmica.
Realizado por: Walter Moposita

(A) Las posiciones y trayectorias de los geófonos se marcan con triángulos y líneas, en rojo la línea sísmica principal y en verde la línea sísmica transversal. Se incluye las curvas de nivel como líneas en negro. (B) Mapa de ubicación de la zona de estudio (cruz roja) dentro del Ecuador, se remarca la provincia de Napo dentro del polígono delineado en negro, además se muestra el modelo digital del terreno. (C) Mapa de ubicación de la zona de estudio a nivel de Sudamérica. (D) Mapa de ubicación de la zona de estudio a nivel local (cuadrado color rojo), se incluye el modelo digital del terreno donde se aprecian las elevaciones montañosas. Se incluyen los ríos en (polígonos azules), carreteras (líneas negras) y asentamientos humanos cercanos (puntos en negros).

Marco Geológico

Ecuador es uno de los países con mayor diversidad geológica del planeta al hallarse ubicado justo al borde occidental de la placa Sudamericana. En esta zona colisionan la placa Sudamericana de origen continental que se desplaza hacia el oeste contra la placa de Nazca y la Astilla Norandina, con un desplazamiento hacia el este y noreste, respectivamente. La placa oceánica con mayor densidad subduce debajo del

continente provocando sismos, vulcanismo y sistemas de fallas distribuidos en dirección NE-SO, los cuales dividen al Ecuador en regiones geo-estructurales (Alvarado et al. 2016, Paladines y Soto 2010)

La zona de estudio se encuentra en la Zona Subandina, una de las 6 regiones geo-estructurales del Ecuador desde este a oeste (Aspden y Litherland 1992). La Zona Subandina presenta una notable actividad sísmica, volcánica y procesos erosivos expresados en grandes deslizamientos de dimensiones kilométricas (Baby et al. 2004). La geología regional del área comprende formaciones rocosas del basamento Subandino y la cuenca sedimentaria Oriente: Batolito de Abitagua, Formación Tena, Formación Tiyuyacu y depósitos aluviales, mostrados en la Figura 2 (Duque et al. 2015).

El batolito de Abitagua (Jurásico Medio) es un cuerpo intrusivo de 120 km de largo y 15 km de ancho compuesto por monzogranito biotítico de grano grueso y granito biotítico de feldespatos potásicos mega cristalinos. La Formación Tena (Paleoceno) se compone de lutitas rojas con varias intercalaciones de areniscas y conglomerados dispersos en profundidades a 200 - 150 metros. En partes inferiores de la formación se presentan areniscas verdosas y marrones. Los colores que presenta son producto de la meteorización superficial y van desde el rojo ladrillo hasta el púrpura. La Formación Tiyuyacu (Eoceno) se encuentra sobre la Formación Tena y se subdivide en dos miembros: Inferior y Superior. Los depósitos del miembro Tiyuyacu Inferior comprenden conglomerados con gradación normal de areniscas gruesas y finas, compuestas por chert rojizos (80%-90%), cuarzo lechoso (10%-20%) y guijarros metamórficos. La matriz se compone de cenizas volcánicas no-vítreas. El miembro Superior se caracteriza por tener una composición litológica diferente al miembro inferior. De este modo, los conglomerados se componen de un 90% por cuarzo lechoso bien a muy bien sorteado, escasa matriz y compuesta por arenisca azulada y verdosa (Ruiz 2002). La zona de estudio atraviesa la Falla Tena, la cual forma escarpes irregulares, facetas triangulares y se infiere a partir de fotointerpretación (Egüez et al. 2003).

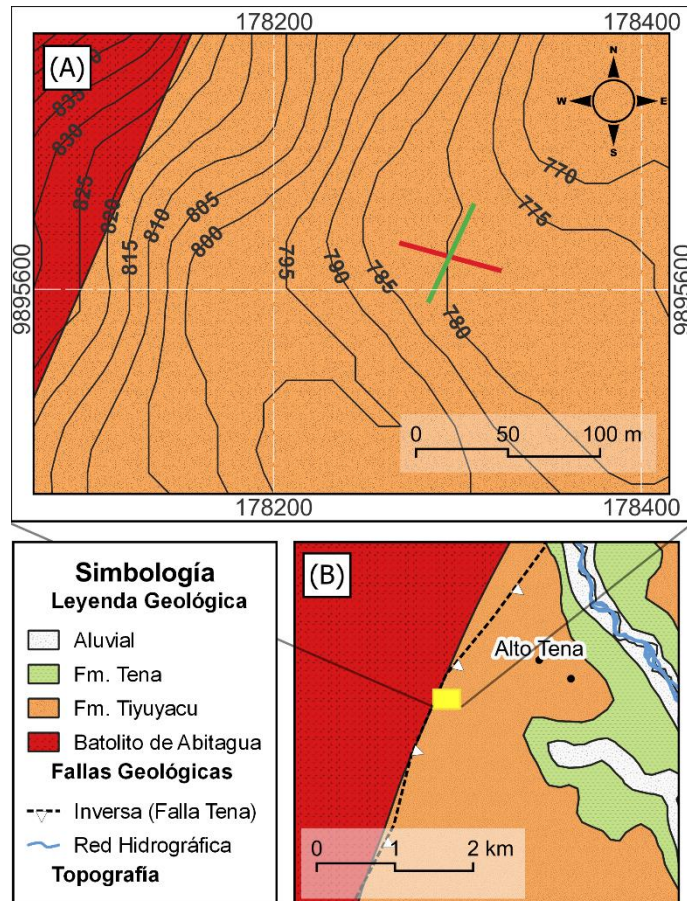


Figura 1: Mapa geológico de la zona de estudio.
Realizado por: Walter Moposita

- (A) Se muestran las principales formaciones geológicas, Batolito de Abitagua (en rojo), Formación Tiyuyacu (en crema). El rango de elevación está dentro de 740 – 840 m s.n.m., representadas por las curvas de nivel (líneas negras). Las líneas sísmicas de nuestro estudio se muestran como segmentos de recta rojo y verde. La información geológica fue extraída del Levantamiento de Cartografía Temática para el cantón Tena, escala 1:25.000, Lote 1 (Duque et al. 2015). (B) Geología Regional de la zona de estudio. De este a oeste, Formación Tiyuyacu, Formación Tena (verde), Depósitos aluviales (en blanco), y Batolito de Abitagua. La línea entrecortada con triángulos blancos representa la falla Tena, del tipo inversa. La falla geológica fue tomada del estudio de Egüez et al. (2003).

METODOLOGÍA

Levantamiento Sísmico

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante el uso del sismógrafo de la marca Geometrics (Es-3000) de 24 canales. Se diseñaron dos líneas sísmicas de 55 m de longitud conformadas por 12 geófonos separados cada uno por 5 metros entre sí (Fig 3). Las líneas se denominaron como “Línea principal AB” y “Línea transversal CD” con una orientación NO-SE y NE-SO respectivamente (Fig 1). Una vez instaladas las líneas sísmicas, se procedió a configurar el programa Seismodule Controller para el registro de datos. Se procedió a la verificación del correcto funcionamiento de los geófonos mediante golpes de prueba y verificando la respuesta en el panel de ruido. Se estableció un total de un golpe por geófono, mismos que fueron efectuados por un martillo de 6 kg sobre una placa de acero.

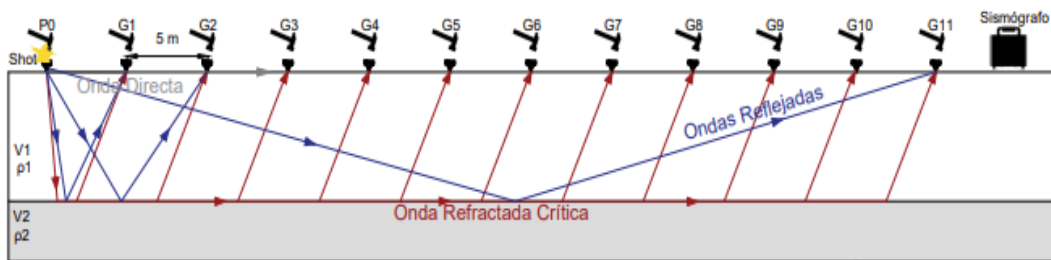


Figura 2: Esquema de la configuración de geófonos empleada para el levantamiento sísmico.

Realizado por: Walter Moposita

En amarillo se representa el primer golpe. Se muestran los rayos de las ondas reflejadas en azul y los rayos de las ondas en refracción crítica en rojo. En este experimento se usan las ondas refractadas. La distancia entre cada geófono es de cada 5m.

Procesamiento De Datos

Para obtener los perfiles del subsuelo a partir de los datos de campo, se utilizaron los módulos Pickwin, Plotrefa y Geoplot del software SeisImager/2D desarrollado por Geometrics.

Picado De Primeras Llegadas

Se utilizó el módulo Pickwin para discriminar de forma manual entre las primeras llegadas del ruido ambiental captado en los sismogramas durante la adquisición de datos.

Generación De Dromocronas

A partir de los sismogramas picados se generaron las dromocronas mediante el módulo Plotrefa. Se descartaron los tiempos de viaje no consistentes con las mediciones obtenidas (Fig. 4).

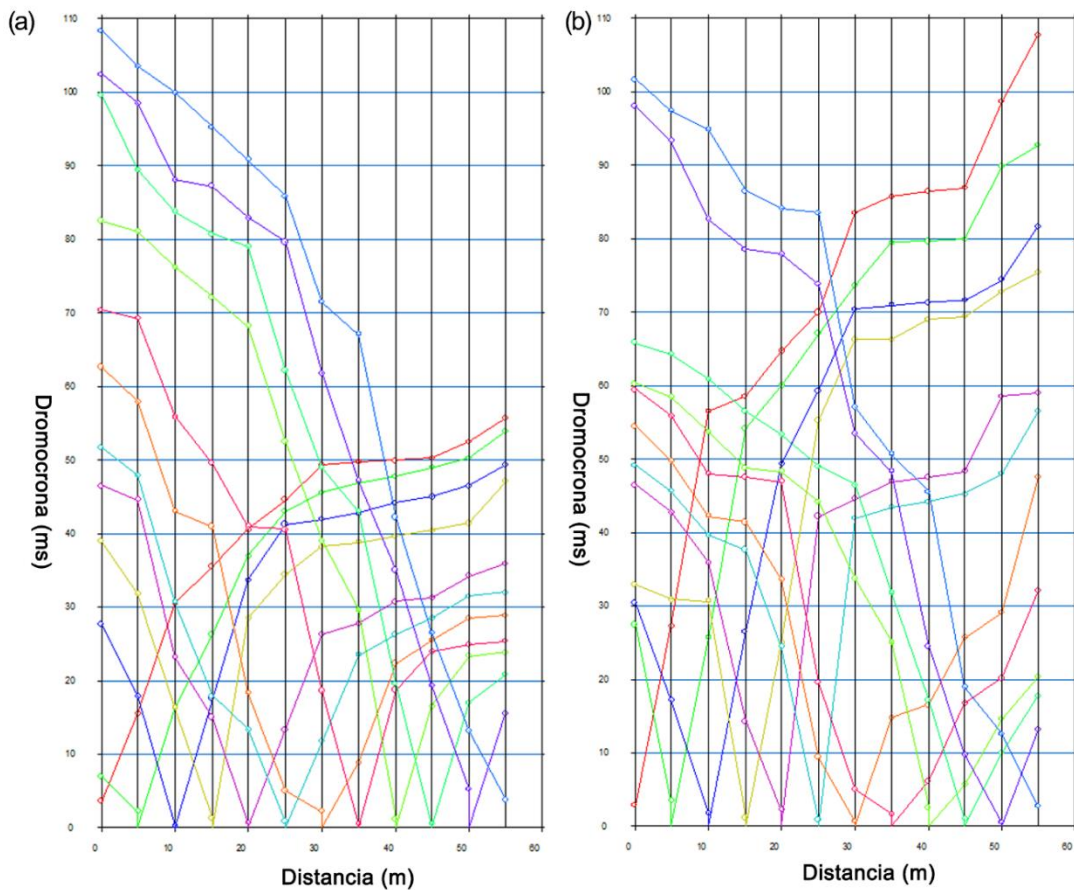


Figura 3: A la izquierda se muestran las dromocronas de la línea sísmica Principal (a) y a la derecha las dromocronas de la línea transversal (b).

Realizado por: Walter Moposita

Los círculos de color representan los tiempos de viaje. Cada dromocrona de color diferente representa un golpe en cada experimento.

Generación Del Modelo Inicial

Continuando con el módulo Plotrefa, se desarrolló un modelo de refracción sísmica inicial (Fig. 5). Para la generación del modelo resultó necesario establecer los criterios velocidad máxima, velocidad mínima y profundidad. Los datos de estos parámetros para cada una de las líneas sísmicas se resumen en el Cuadro 1. Las velocidades se determinaron mediante pruebas numéricas que permitieron discriminar de manera empírica el modelo inicial más adecuado. El alcance en profundidad del modelo se determinó mediante el trazado de rayos sísmicos.

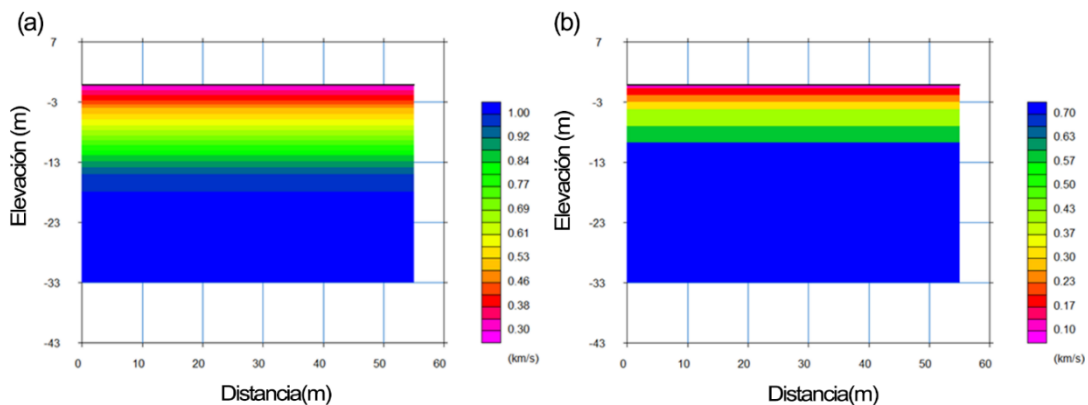


Figura 4: Modelo inicial generado para la línea sísmica Principal (a) y Transversal (b).
Realizado por: Walter Moposita

Cuadro 1: Parámetros empleados para el desarrollo del modelo de refracción sísmica inicial.

Línea	Profundidad desde la superficie hasta la capa más baja (m)	Velocidad mínima (km/s)	Velocidad máxima (km/s)
Línea principal	15	0.3	1.0
Línea transversal	10	0.1	0.7

Realizado por: Walter Moposita

Generación De Tomografía Sísmica

La resolución del método de tomografía sísmica recae dentro de la categoría de los problemas inversos. La solución a dichos problemas depende en gran magnitud de los datos observados, siendo necesario contar con datos de campo fiables. El ruido y los errores en los datos de entrada son transmitidos a los parámetros del modelo a través

del algoritmo de inversión. En dependencia de las variaciones en los datos de entrada, las soluciones al modelo inverso pueden ser infinitas; por tanto, los algoritmos deben ser guiados con información a priori y técnicas de regularización (Pedruelo 1995).

El algoritmo de inversión empleado por SeisImager se basa en un método de mínimos cuadrados, calculando las curvas de viaje a partir de los datos observados a la vez que presenta la calidad de esta inversión expresada como un error RMSE (*Root Mean Square Error*). La tomografía sísmica pretende minimizar este error mediante un trazado iterativo de rayos a través del modelo a priori, comparando tiempos de viaje medidos y calculados, comparando los resultados y repitiendo el proceso (Geometrics 2009). El número de iteraciones que el software establece por defecto es 10, sin embargo, un número mayor de iteraciones permite obtener una solución más aceptable. Para determinar el número de iteraciones adecuado se graficó el RSME y el número de iteraciones hasta que el error se mantuviera estable (Fig. 6).

Para determinar la solución más óptima al problema inverso fue necesario aplicar pruebas numéricas a los parámetros empleados por el software (suavizado y número de iteraciones). Se realizaron varios modelos de inversión variando los suavizados en sentido horizontal y vertical. Para esto se mantuvo constante el suavizado en uno de los ejes mientras se probó con las variaciones admitidas por el software en el otro eje, a pasos de $\lambda = 0.1$ y viceversa. El suavizado elimina objetos generados por velocidades a pequeña escala que de otra manera podrían interpretarse como reales (Geometrics 2009). Este suavizado se genera de forma independiente en cada uno de los ejes, pudiendo ser optimizado con un mayor número de pasadas. Al tomar el suavizado como la variable de regularización de la cual depende la solución del problema inverso fue necesario determinar la mejor configuración entre suavizado horizontal y vertical.

El criterio empleado para esto fue la curva L (Hansen, 1998). La curva L corresponde a un gráfico que compara una norma regularizada frente su correspondiente residual. La curva muestra la compensación entre el tamaño de una solución regularizada y su ajuste a los datos dados, permitiendo elegir un parámetro de regularización apropiada. Cada punto de la curva representa un modelo distinto derivado de las variaciones del parámetro de suavizado, normalizado y contrastado con su error correspondiente. La alineación de los modelos con la particular forma en L de la curva confirma que los

datos tienen información coherente y estadísticamente significativa (Soldati et al. 2006).

Para determinar la configuración entre suavizados que dio una solución más cercana al modelo a priori se empleó la norma L_p , una medida estadística de la variación de los datos calculados respecto a un vector constante medido. Como se muestra en Kaur (2000), para una serie de datos finitos X , representados como un vector $x = (x_1, \dots, Xn)$, la dispersión respecto a un punto c según la norma p (normalizada para un número de puntos n), viene dada por la (ec. (1)).

$$L_p = f_p(c) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - c|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

En este caso se empleó las normas L_1 , L_2 y L_{inf} ; correspondientes a la mediana de la desviación absoluta promedio, mediana de la desviación estándar y el rango medio de la desviación máxima respectivamente (Kaur 2000). Según indica el criterio de la curva L (Hansen 1992), el valor óptimo fue localizado en el vértice de la misma (Fig. 8).

RESULTADOS

En la (Fig. 6) se observa el error obtenido por el modelo de inversión sísmica, manteniendo un suavizado horizontal de 1 y variando el suavizado vertical desde 0.3 a 1.0 a pasos de $\lambda = 0.1$, dónde para todos los casos el error se mantiene estable a partir de las 50 iteraciones, siendo este, por tanto, el número de iteraciones empleados para ejecutar el modelo de tomografía.

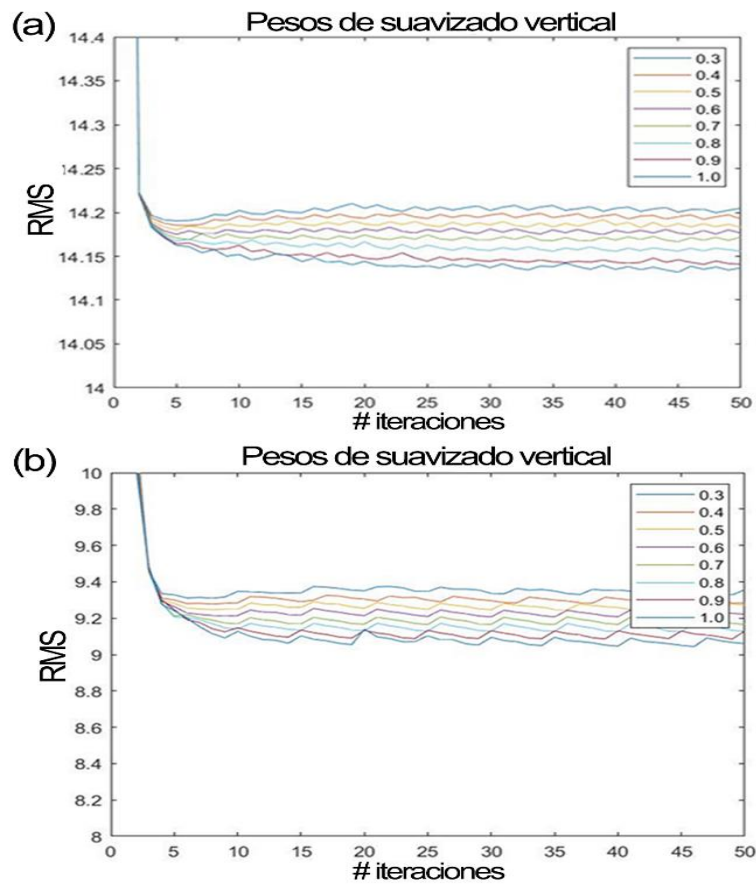


Figura 5: Gráfico de convergencia para el RMS a lo largo de las iteraciones con suavizado horizontal 1, y suavizado vertical de 0.3 a 1.0.

Realizado por: Walter Moposita

Las líneas de color representan diferentes valores de suavizado vertical. (a) Gráfico de convergencia para la Línea Principal, (b) Gráfico de convergencia para la Línea Transversal.

La curva L mostró que la configuración más adecuada, tanto en la línea principal como en la transversal fue de un suavizado horizontal igual a 1.0, y en vertical igual a 0.9. En la figura 7 se muestran 3 gráficos de curvas L por cada línea sísmica, las cuales representan 3 tipos de normas. La figura izquierda representa la norma L2, la figura central la norma L1, y la figura a la derecha representa la norma infinita.

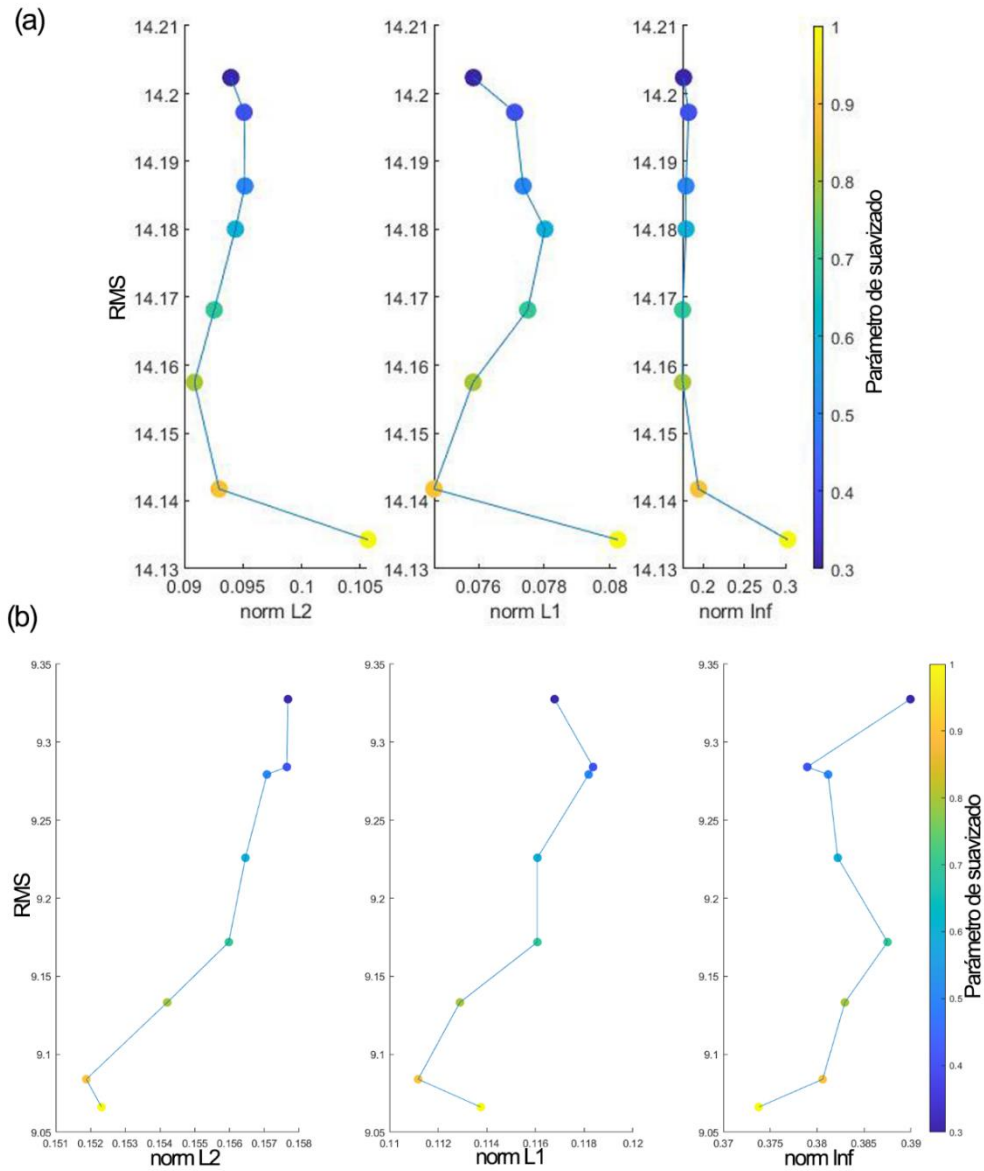


Figura 6: Gráfico de las curvas L para la Línea Principal (a) y Transversal (b).
Realizado por: Walter Moposita

Estas curvas se graficaron con un valor de suavizado fijo horizontal de 1 y los valores de suavizado vertical se muestran en una escala de colores en la derecha. En ambos casos el vértice de curva corresponde a un parámetro de suavizado horizontal 1 y parámetro vertical de suavizado 0.9.

En la Figura 8 se presenta el resultado de la tomografía sísmica, tanto para la línea principal como transversal. En ambos casos se puede observar 3 unidades sismoestratigráficas bien diferenciadas con un incremento en la velocidad de las ondas P, directamente proporcional a la profundidad de los estratos. Para el caso de la línea principal, la V_p se encuentra en rangos que van de los 0.3 a los 0.97 Km/s; mientras que para el caso de la línea transversal los rangos de V_p se encuentran entre los 0.11 y 0.67 Km/s.

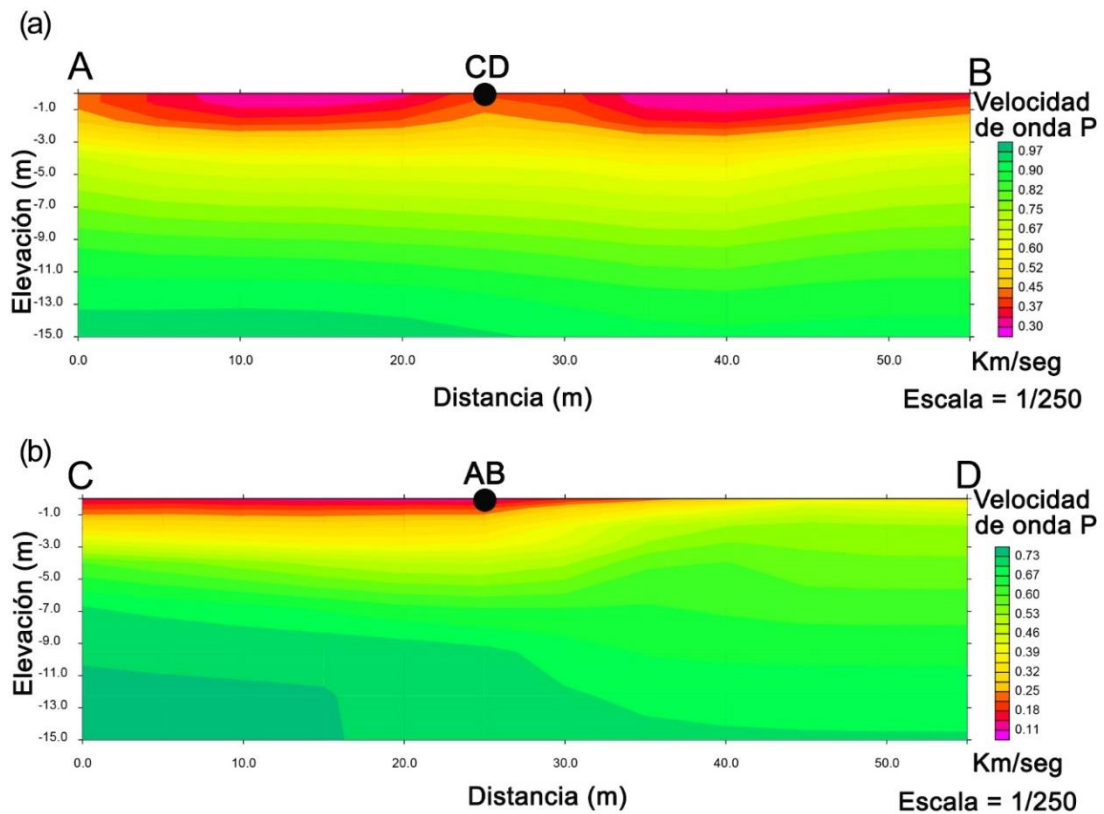


Figura 7: Resultado de la tomografía de refracción sísmica para la Línea Principal (a) y Transversal (b).

Realizado por: Walter Moposita

DISCUSIÓN

Se identificaron 3 unidades sismoestratigráficas, numeradas del 1 al 3, desde la más superficial a la más profunda (Fig. 9).

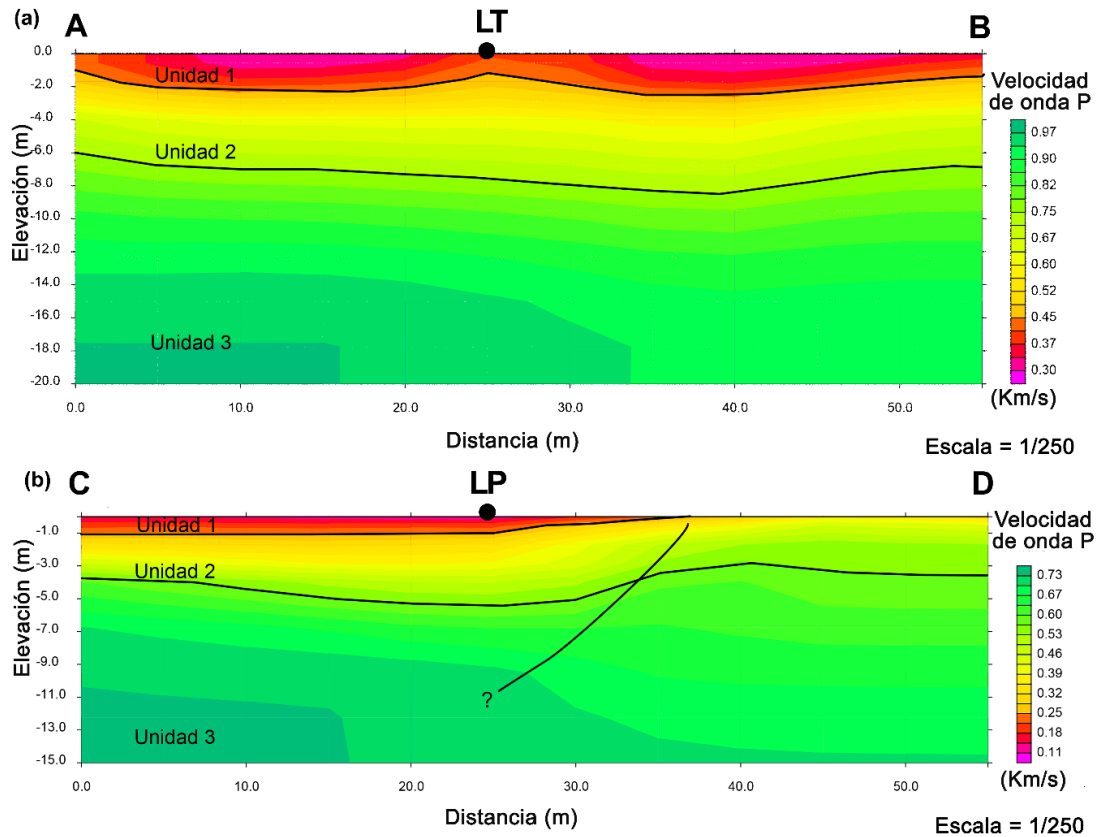


Figura 8: Interpretación de las unidades sismoestratigráficas identificadas en los resultados de tomografía sísmica.

Realizado por: Walter Moposita

En (a) línea principal y (b) línea transversal. La distancia y la profundidad están en metros y las velocidades de la onda P en Km/s. El punto en negro indica la intersección con las líneas sísmicas Transversal (LT) y Principal (LP).

Basado en la interpretación de los resultados de la tomografía sísmica, en la línea principal se puede evidenciar las siguientes características. La unidad 1 que inicia desde superficie, se localiza entre los 0 y 2 metros de profundidad. Es interesante observar que, la unidad 1 de la línea sísmica principal presenta un adelgazamiento a 25 metros de distancia horizontal, mientras que la unidad 2 no sigue la misma forma en esa distancia. Las velocidades de onda están entre 0.30 y 0.45 km/s. En general, la unidad es sub-horizontal, pero presenta un buzamiento diferente de cero en la parte

central (adelgazamiento de la capa). Con base en la guía estándar para el uso del método de refracción sísmica D 5777-00 de la ASTM (2000) y el estudio de Olona et al. (2010), se describieron los tipos de materiales geológicos de cada unidad, de acuerdo a las velocidades de onda P (Fig. 9-a). La unidad 1 corresponde a un material superficial altamente meteorizado.

La unidad 2 se encuentra ubicada entre las unidades 1 y 3, situándose entre los 2 m y 8 m de profundidad, donde se registraron velocidades de onda que van desde 0.5 a 0.7 km/s aproximadamente. Esta unidad se inclina con ángulos entre 10° a 30° en los primeros 5 metros de distancia, y desde los 40 a 55 metros de distancia. Además, tiene un espesor *cuasi* constante, con leves variaciones tanto en los extremos y en la parte central de la línea sísmica como se observa en la Figura 9-a. En zonas regulares, el espesor de la unidad es de aproximadamente 6 m, mientras que en las zonas donde se registra variaciones, el espesor aumenta hasta los 7 m (Fig. 9-a). Las velocidades de onda en esta unidad indicarían que está unidad se compone por granito convertido a suelo arenoso (Olona et al. 2010), lo cual además concuerda con el marco geológico local y las cartas geológicas nacionales, ya que la Formación Granito de Abitagua se encuentra cercana. Es importante mencionar que la zona de estudio tiene un clima tropical, que favorece la intensa meteorización de suelos y rocas, disminuyendo sus propiedades físicas (Aydin y Basu 2005). La unidad 3 es la más profunda, localizada a partir de los 6 metros. El rango de apreciación del equipo permitió identificar una potencia de al menos 14 metros. Sin embargo, no es posible inferir la disposición o variaciones de espesor a lo largo del perfil sísmico, pues no se conoce la base de esta unidad. Los rangos de velocidad de onda p se encuentran entre los 0.70 y 0.97 Km/s (Fig. 9-a), que podrían corresponder con gravas y arenas provenientes del regolito altamente meteorizado del granito de Abitagua. Sin embargo, la interpretación geológica de los materiales y su asociación con alguna formación litológica en específico, debería tratarse en un estudio posterior.

En cuanto a la línea sísmica transversal, la Unidad 1 tiene una profundidad entre 0 y 1 metro, haciéndose más delgada en dirección AB hasta desaparecer a los 35 metros desde la distancia cero, denotando una capa tipo cuña. Las velocidades de onda se encuentran en un rango entre 0.11 a 0.25 km/s, las cuales corresponden a un material superficial altamente meteorizado (Fig. 10 b).

La unidad 2 presenta una geometría irregular a lo largo de la línea sísmica transversal, desde la dirección NE incrementa la potencia en sentido SO hasta alcanzar un espesor máximo de 5 m a los 25 m desde $x = 0\text{m}$. Hasta los 38 m en sentido horizontal, se encuentra subyaciendo a la unidad 1, hasta finalmente aflorar en superficie hasta los 55 m. Las velocidades registradas que caracterizan esta unidad van desde los 0.25 a 0.4 km/s aproximadamente, correspondiendo a materiales superficiales meteorizado, tal como se describe también en la unidad 1 de la línea principal.

Finalmente, la unidad 3 se encuentra ubicada a partir de los 4 m de profundidad. El contacto de la unidad 2 y 3 disminuye en el centro de la línea sísmica y aumenta a los 40 metros de distancia horizontal en dirección CD. Los rangos de velocidades de onda P varían entre los 0.4 y 0.73 Km/s, que corresponden a materiales de tamaño arena (ASTM 2000, Olona et al. 2010).

A los 30 metros de distancia de la línea sísmica transversal, existe una inclinación con buzamiento mayor a 10° (levantamiento) entre el contacto de las unidades 2 y 3. Además, de 0 a 38 metros de distancia en sentido horizontal, la unidad 1 disminuye progresivamente su espesor hasta los 0 metros. También, la deformación de las unidades 1 y 2 es concordante en las distancias de 30 a 40 metros. Por tales razones, se propone la existencia de una falla inclinada que afecta la unidad 2 y al menos los primeros 6 metros de la unidad 3, como se observa en la Figura 9-b. Sin embargo, no se pudo observar rasgos geomorfológicos en superficie por la densidad de la vegetación.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio se realizaron dos ensayos de tomografía sísmica donde se identificaron 3 unidades sismo estratigráficas. La línea principal permitió realizar un modelo de tomografía sísmica que alcanza los 20 metros de profundidad, mientras que la línea transversal generó un modelo de 15 metros de profundidad. Estos modelos registran velocidades de la onda P que van desde los 0.30 km/s hasta los 0.97 km/s, y 0.11 km/s hasta los 0.73 km/s, para la línea principal y transversal, respectivamente.

Con base en los rangos de velocidades de onda P para suelos y rocas se puede interpretar que la línea principal y transversal están compuestas por material altamente

meteorizado en superficie, y que corresponde a la unidad 1 en ambos casos. De igual manera, las unidades 2 y 3 se componen de materiales de tamaño grava o arena meteorizados. Esta interpretación es consistente con el contexto geológico local, y podría corresponder al regolito proveniente del Granito de Abitagua - Guacamayos, compuesto por suelo arenoso de origen granítico. Se propone la existencia de una falla geológica inclinada en la línea sísmica transversal, debido a la disposición geométrica de las capas.

La técnica de tomografía sísmica es adecuada para obtener información de los primeros metros del subsuelo. Los datos sismo-estratigráficos generados en este estudio deben ser utilizados en la formulación de planes de ordenamiento territorial, en la obtención de parámetros de diseño sísmico para las obras de ingeniería civil y proyectos de expansión urbana cerca de la ciudad de Tena, así como en la caracterización geológica y geotécnica del piedemonte amazónico en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., y Cisneros, D. 2016. Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35: 1048–1065.
- Aspden, J. A., and Litherland, M. 1992. The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*.
- ASTM. 2000. Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. *En Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1–14.
- Aydin, A., y Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*.
- Baby, P., Rivadeneira, M., y Barragán, R. 2004. *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo*. Lima.
- Bery, A. A., y Saad, R. 2012. Correlation of Seismic P-Wave Velocities with Engineering Parameters (N Value and Rock Quality) for Tropical Environmental Study. *International Journal of Geosciences*, 3: 1–9.
- Duque, J., Gonzáles, S., Andrade, X., y Garzón, Ó. 2015. Levantamiento de Cartografía Temática Escala 1:25.000, Lote 1 para el Cantón Tena. 1–138 pp.
- Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., y Machette, M. 2003. Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Ecuador and its Offshore Region.
- GAD Tena, G. 2020. Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial 2020-2023.
- Geometrics. 2009. *Seislmager/2D*.
- Gómez, A., Marín, E., y Ospina, J. P. 2019. Determinación del Perfil Sísmico y el Período Fundamental de Suelo para la Estación Acelerográfica de la Universidad Libre Seccional Pereira. *Universidad Libre Sede Belmonte*. 18–30 pp.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid, España. 744 pp.
- Grelle, G., y Guadagno, F. M. 2009. Seismic refraction methodology for groundwater level determination: “Water seismic index.” *Journal of Applied Geophysics*, 68: 301–320. Elsevier B.V.
- Guzmán, O., Araujo, S., Espín, J. R., Guamán, A., and García, I. 2022. Análisis Sismoestratigráfico Geológico-Estructural Geotécnico San Luis, cantón el Chaco.
- Hansen, P. C. 2001. The L-Curve and its Use in the Numerical Treatment of Inverse Problems. *En Computational Inverse Problems in Electrocardiology*, pp. 119–142. Ed. por P. Johnston. WIT Press,

Australia.

- Imani, P., Tian, G., Hadiloo, S., y El-Raouf, A. A. 2021. Application of combined electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction tomography (SRT) methods to investigate Xiaoshan District landslide site: Hangzhou, China. *Journal of Applied Geophysics*, 184: 104236. Elsevier B.V.
- Kaur, S. 2000. *Research and Statistics in Physical Education*. Friends Publications, Nueva Delhi. 83–85 pp.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. 2002. Seismic refraction surveying. *En An Introduction to Geophysical Exploration*, Tercera Ed. Blacwell Science.
- MAAE, M. del A. A. y T. E. 2013. *Modelo de Unidades Geomorfológicas para la Representación Cartográfica de Ecosistemas del Ecuador Continental*. Quito. 27 pp.
- Mojica Ábrego, A., Solís, J., Vergara, F., Duarte, B., Harris, J., y Pastor, L. 2012. Detección de aguas subterráneas en los suelos sedimentarios de la Extensión de Investigación de Tocumen de la Universidad Tecnológica de Panamá mediante la imaginería bidimensional de resistividad eléctrica y refracción sísmica durante la época seca. *Revista I+D Tecnológico*, 8: 1–10.
- Oloná, J., Pulgar, J. A., Fernández-Viejo, G., López-Fernández, C., y González-Cortina, J. M. 2010. Weathering variations in a granitic massif and related geotechnical properties through seismic and electrical resistivity methods. *Near Surface Geophysics*, 8: 585–599.
- Paladines, A., y Soto, J. 2010. *Geología y Yacimientos Minerales del Ecuador*. Universidad Técnica Particular de Loja. 14–16 pp.
- Parada, L. F. 2018. *Aplicación de Técnicas Geofísicas Basados en Ondas Superficiales para la Caracterización Sísmica de Taludes y/o Laderas*. Universidad del Bio-Bio.
- Pedraza, S. 2005. *Tomografía de Refracción de primeras llegadas de una línea no recta en el campo Skellefte, al norte de Suecia*. Universidad Simón Bolívar. 1–75 pp.
- Pedruelo, L. 1995. *Diseño, análisis y aplicación de las Curvas de Tiempos Medios en problemas de tomografía sísmica en transmisión*. Universidad de Oviedo.
- Reyes, P. 2009. *Discusión sobre la Evolución Jurásico-Cretácica de la Cordillera Real y el Bloque Amotape*. Quito. 1–17 pp.
- Rinaldi, V., Ibarra, H., Viguera, R., y Harasimiuk, J. 2016. Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3: 1–7.
- Ruiz, R. 2002. *Exhumation of the northern Sub-Andean Zone of Ecuador and its source regions a combined thermochronological and heavy mineral approach*. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich.
- Soldati, G., Boschi, L., y Piersanti, A. 2006. Global seismic tomography and modern parallel computers. *Annals of Geophysics*, 49: 977–986.

Zafra, D. 2018. Ondas Sísmica, su importancia para la geofísica y la humanidad. Universidad Industrial de Santander, 3: 13.